

エネルギーに関する実験の検討(その1)

— 気体分子の運動 —

斎藤 進¹ 土佐 弘²
柳瀬 一男³ 下村 忠行⁴

この研究は気体の分子運動をエネルギー的にはあくさせることをめざす実験例として、気体の流出の実験、および気体の拡散における不可逆過程のモデル実験について検討したものである。気体の流出の実験では、注射器内の各種の気体の流出速度を比較し、粒子によるモデル実験と合わせて、定性的に気体分子の運動についてはあくできることがわかった。また、不可逆過程の実験では粒子の分布状態が再び元の状態に戻るまでの時間を測定し、粒子数が4個以上で理論値と一致する結果が得られた。

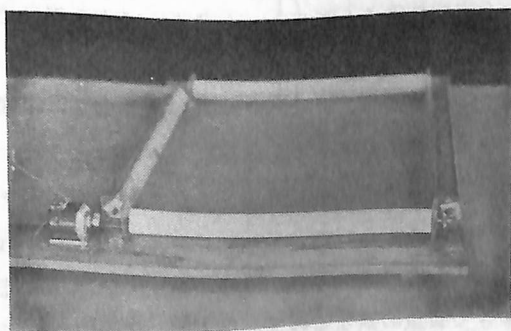
1 はじめに

分子のモデルとして銅球やガラス球を用い、多数の粒子のふるまいを調べる分子運動モデル装置(たとえば図1)は、粒子概念の指導に欠くことのできないもののひとつである。この装置により、定量的あるいは定性的に物質の三態やボイル・シャルルの法則についての理解を深めることができるし¹⁾、より詳しく気体分子のふるまいを追求すれば、気体の熱エネルギーと分子の運動エネルギーとの関係や、分子運動の不可逆性へと発展させることができる。このように気体の分子運動に関する教材は、粒子概念のはあくとともに、エネルギー的な見方・考え方についての理解を深めることのできる教材である。

筆者らは、気体の分子運動をエネルギー的にはあくさせるための実験例として、分子運動モデル装置を用いた気体の流出および分子運動の不可逆性に関する実験をとりあげ、種々検討したので報告する。

2 分子運動モデル装置

分子運動モデル装置は、(図1)のような平面型²⁾と円筒内で粒子を運動させる立体型が考えられる。本実験に使用したのは、(図1)の平面型のもので、モーターと4本の角材がスプリングジョイントでつながれており、角材の回転によって粒子をはじき飛ばし無秩序運動をさせるものである。この装置は、製作が容易で低廉であり、大型なので観察もしやすく、OHPによる拡大投影も可能である。また、分子運動についての学習を進めるとき、一貫してこの



(図1) 分子運動モデル装置

1 羽茂町立羽茂中学校 2 見附市立理科教育センター 3 長岡市理科教育センター 4 新潟県立教育センター

装置を用いることができるので、内容ごとに異なる装置や粒子を用いるよりも、生徒の理解が容易であると考えられる。

3 気体の流出

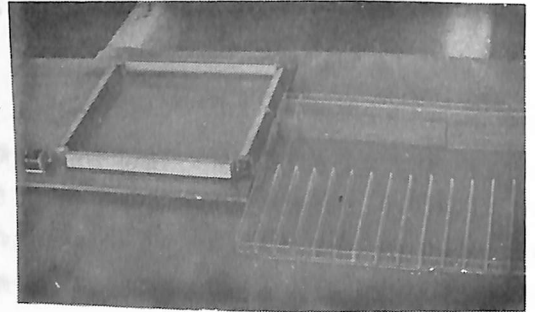
「等温の気体分子の平均の速さは、分子の質量が小さいほど大きくなる」ことは、分子運動モデル装置による実験において、モーターの回転数および粒子数を一定にし、粒子の質量を変えた場合を比較すれば容易に推定できる。一方、実際の気体について、この関係が成立していることを確かめる実験としては、種々の気体が小さいな孔から噴出するに要する時間の違いを測定し、気体の分子運動の速さを比較する実験³⁾がある。

この気体流出の実験とそのモデル実験をとおして、気体の分子運動に関する理解をいっそう深めることができる。

(1) モデル実験

この実験は、注射器を用いた気体の流出の実験に対応するモデル実験である。

〔実験方法〕(図2)のように回転棒にみぞをつけた分子運動モデル装置を受け器といっしょにセットする。つぎに、装置の中へ12個の鋼球を入れ、回転棒を回転させて、無秩序な運動をさせる。すると、回転棒のみぞ(スリット)を通過した鋼球が受け器にはいる。



(図2) 実験装置

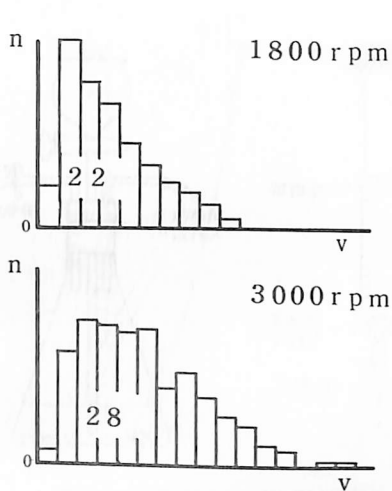
このような方法で、一定時間内にスリットを通過してとび出してくる鋼球の数と速度分布を調べる。なお、鋼球がとび出すごとに、その数だけ鋼球をただちに補給して、装置内の全個数(密度)を一定に保つ。このことは、つぎの気体の流出の実験において注射器内の気体の密度(圧力)がつねに一定であることに対応する。

つぎに、質量の小さい鋼球について同様に測定する。また、回転数を変えて同様に測定する。

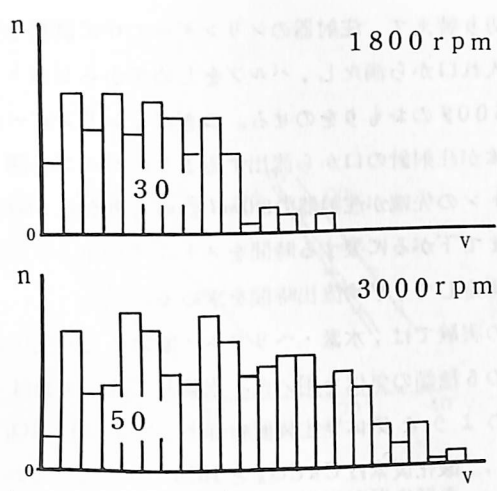
〔実験結果〕(図3)、(図4)はその結果である。横軸は、粒子の速度 v 、縦軸は、それぞれの個数 n を表わしている。図中の数字(22, 30)は一定時間にとび出した個数である。

この結果から、質量の大きい鋼球は小さい鋼球に比べて、平均速度が大きく一定時間内にスリットをとび出す個数が多いことがわかる。このように、回転数や測定時間を一定にして実験をすると、粒子の質量のちがいで運動の速度が変わることや、スリットをとび出す個数にちがひがあること、すなわち、速度が速いほどスリットを通り抜けやすいことがわかる。

また、原子の大きさが原子の種類に無関係にほとんど同じであることを知っているときには、同じ大きさで質量の異なる粒子の場合について実験してみることも必要であろう。このような場合、鋼球と大きさの等しいガラス球を準備して実験することができる。直径11mmの鋼球とガラス球を用いた場合、回転数2000rpmのとき、5分間あたりのとび出す数は鋼球が平均26個、ガラス球が平均35個であっ



(図3) 質量 546 g の鋼球 12 個の場合



(図4) 質量 108 g の鋼球 12 個の場合

た。なお、この場合、ガラス球と鋼球の反ばつ係数のちがいが影響しているようである。

(2) 気体の流出の実験

この実験は、各種の気体の流出時間を測定して、気体分子の平均の速さを比較する実験である。

〔理論〕(図5)において、等温等圧のとき、注射器内の気体の体積を一定にすれば、その分子数は気体の種類に関係なく一定である。同数の分子が全部注射器から流出する時間を t とすると、 t の逆数は、気体分子の平均の速さ v に比例すると考えられる。すなわち、

$$v \propto 1/t \quad (1)$$

である。分子量を M とすると、この場合、分子の運動エネルギーは一定であるから、 Mv^2 は一定である。したがって、 M と v^2 は反比例の関係にあるので、(1)式より

$$1/\sqrt{M} \propto 1/t$$

$$\therefore M \propto t^2 \quad (2)$$

となる。すなわち、流出時間 t の2乗が分子量 M に比例する。

また、気体分子の運動エネルギーは絶対温度 T に比例するから、

$$v \propto \sqrt{T}$$

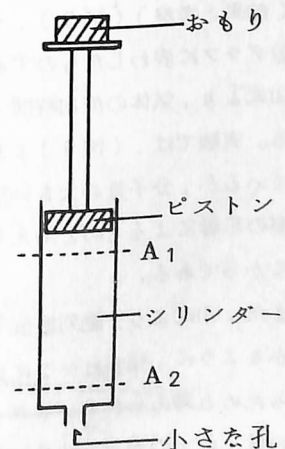
となり、したがって、 T と t との間には

$$T \propto 1/t^2 \quad (3)$$

の関係が成り立つ。

〔装置・方法〕(図5)のように、注射器(50 ml)のシリンダーの中に流出時間を測定しようとする気体を入れ、その気体を注射針の孔から押し出すために、ピストンの上におもりをのせる。ピストンがあるレベル A_1 から、それより低いレベル A_2 に下がるまでの時間を測定して、各気体の流出時間を求める。

(図6)は、実験で使用した装置を示している。三方コックのバル



(図5)

ブを切り替えて、注射器のシリンダーの中に試料を気体取り入れ口から満たし、バルブをしめてからピストンの上に500gのおもりをのせる。つぎに、シリンダーの中の気体が注射針の口から流出するようにバルブを開き、ピストンの先端が注射器の50mlのめもりから5mlのめもりまで下がるに要する時間をストップウォッチで測る。数回測定して、平均流出時間を求める。

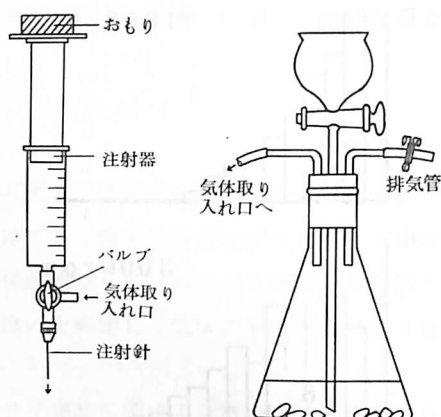
この実験では、水素・ヘリウム・酸素・二酸化炭素・空気の5種類の気体を用いた。水素と二酸化炭素は(図7)のような気体発生装置を作り、水素は H_2SO_4 と Zn 、二酸化炭素は CaCO_3 と HCl の反応でそれぞれ発生させ、ゴム管で測定装置(図6)の気体取り入れ口につなぎ、シリンダー内に気体を満たした。ヘリウムと酸素は、ボンベにつめられて市販されているものを使用した。

以上のようにして、それぞれの気体の流出時間を測定するとともに、気体の温度を変えて各温度における流出時間も測定した。(図8)は、小型の水槽に水を入れ、ヒーターで熱して注射器内の気体の温度を上げる加熱装置である。気体を低温にする場合は、水槽内に氷と寒剤を入れて冷却した。流出時間を測定した際の各気体の温度は、85℃、50℃、14℃、0℃、-17℃の5つの点である。

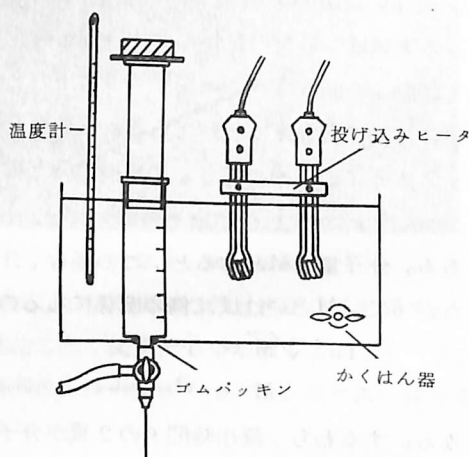
〔結果と考察〕(図9)、(図10)は、実験結果を対数グラフに表わしたものである。

(2)式より、気体の流出時間 t の2乗は分子量 M に比例する。実験では、(図9)より明かなように、分子量の小さい H_2 、 He については、この関係が成り立っているが、分子量の大きい空気、 O_2 、 CO_2 では、ほぼ t の3乗に比例している。これは、ピストンの摩擦の影響によるものと考えられる。すなわち、流出時間 t が大きくなるほど摩擦の影響が強くなるからである。

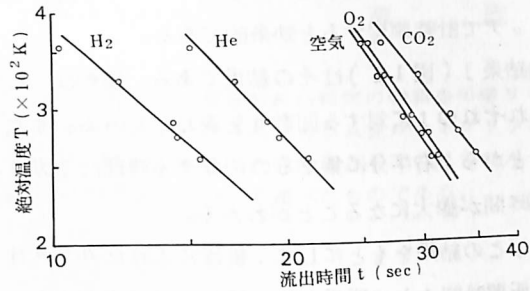
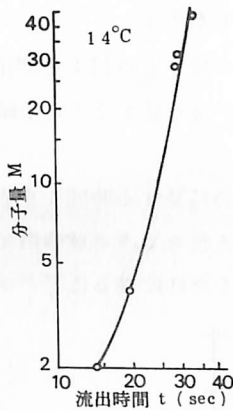
また、(3)式より、絶対温度 T と流出時間 t の2乗の逆数とは比例する。実験では、(図10)より明かなように、傾きは-2に比べてゆるやかである。これは、温度変化によってピストンの摩擦が変化するためと考えられる。また、5種類の気体の中でも、 H_2 、 He が特に大きく t^{-2} から離れた値を示すのは、分子の質量が小さいために空気中に流出しにくいことの影響によるものと考えられる。このように、この実験を定量的に扱うためには、ピストンの摩擦を補正し、真空中に流出させる場合について



(図6)測定装置 (図7)気体発生装置



(図8) 加熱装置



(図9) 気体の分子量と流出時間の関係 (図10) 各気体における温度と流出時間の関係

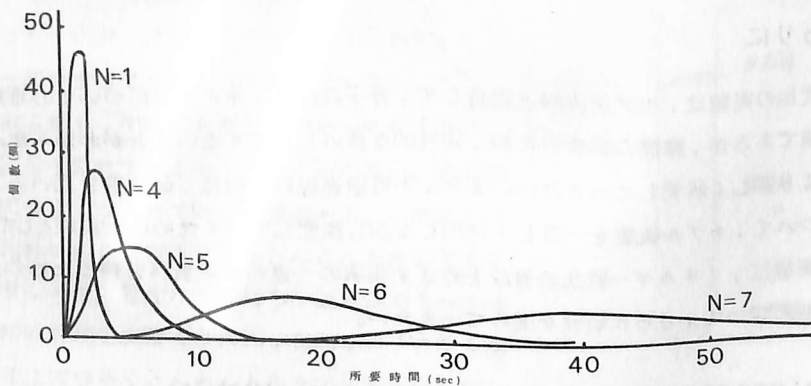
測定し検討する必要があるが、今後の課題としたい。

4 不可逆過程

自然界には、エネルギー保存則には矛盾しないが実際には起り得ない現象がたくさんある。摩擦のともなうような力学的現象はすべてそうである。このように、自然の流れは一方通行であるということを理解していくことは、エネルギーの転換・保存とならんで、エネルギー概念の指導において欠くことのできないことである。

この実験は、分子運動モデル装置により粒子の拡散する様子を観察・測定し、不可逆過程についての理解を深めようとするものである。

〔実験方法〕分子運動モデル装置に、ガラス球を1個入れて、回転棒を回転させ無秩序な運動をさせる。この無秩序な運動の途中で、装置の右半分にガラス球が全部はいる瞬間がある。その瞬間から再び



(図11) 右半分に集まるのに要する時間と個数の関係

その状態が再現するまでの時間 t を測定し記録する。それを100回くりかえす。

つぎに、ガラス球の数を2個、3個と増して同様に右半分に集まるのに要する時間 t を測定する。

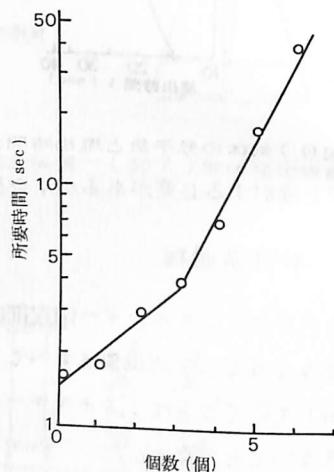
この実験は、OHP の上で左半分を紙でおおって投影し、ガラス球の影が全く見えなくなる瞬間をストップウォッチで計時測定すると効果的である。

〔実験結果〕(図11)はその結果である。横軸は、右半分を集まるのに要する時間 t を表わし、縦軸は、それぞれの t に対する回数 n を表わしている。また、 N は装置に入れたガラス球の数である。

このことから、右半分に集まるのに要する時間は、ガラス球の数が多くなればなるほどバラツキが多く、所要時間が膨大になることがわかる。

さらに、この結果をもとにして、装置に入れたガラス球の数 N と所要時間 t との関係を片対数グラフに表わすと、(図12)のようになる。縦軸は右半分に集まるための所要時間 t であり、横軸はガラス球の個数 N である。 t は N の増加とともに指数関数的に増加していくことがわかる。

つぎに、確率的に個数 N と所要時間 t との関係を求めてみる。1個の場合は、右半分に存在する確率は $1/2$ である。この確率と最初の状態を再現するのに要する時間 t との間には反比例の関係がある。したがって、 $N=1$ の場合の t を2とすると2個の場合は確率が $1/4$ であるから所要時間 t は4である。このように考えていくことにより、所要時間 t は 2^N に比例することがわかる。(図12)のグラフから明らかなように、 $N=4$ 以上においては



(図12) 所要時間と個数の関係

この関係がみたされている。1～3個までの間でこの関係がみたされないのは、構造上完全な無秩序運動が保てないことなどのモデル装置の限界と、粒子数が少ないことによるためである。

この実験をとおして、実際の気体においては、拡散した気体が再び元の真空状態にもどる可能性は全くないと考えるのが正しいことを、容易に理解できよう。

5 おわりに

気体の流出の実験は、モデル実験と総合して、分子の運動エネルギーについての理解を深めることをめざす実験であるが、摩擦の影響のため、定性的な扱いしかできないことがわかった。今後、定量化について、より詳しく研究していきたい。また、不可逆過程の実験は、硬貨等を用いる方法もあるが、分子運動について、モデル装置を一貫して使用しながら探究していくための一実験として検討したものである。

以上の実験は、エネルギー概念の育成をめざす指導の一連の基礎資料を得るためのものであり、関連する諸実験について、さらに研究を進めていきたい。

文 献

- 1) 斎藤 進：新潟県立教育センター研究集録第4集理科研究編(2)(1971) PP 15—22
- 2) 山内恭彦ほか訳：IPS物理，岩波書店(1969) P 153
- 3) 平田邦男：科学の実験 Vol 22 No 4 (1971) P 86